**Capítulo 3**

**Segmentación de ultrasonido de mama**

La segmentación de imágenes se refiere al proceso de particionar una imagen en un conjunto de regiones que conforman el total de la imagen. Una región segmentada se define como un conjunto de pixeles que comparten ciertas características y que existe un borde que separa esta región de otras. El objetivo de este procedimiento en muchas aplicaciones es que las regiones sean áreas de interés; cuando las regiones segmentadas no cubren la imagen completa aun así se puede hablar de segmentación ya que se pueden definir las regiones no segmentadas como el fondo de la imagen [1]. En casos simples, en donde las imágenes no presentan ruido y las características que dividen a las diferentes regiones de la imagen están bien definidas, el proceso de segmentación requiere uso de algoritmos sencillos; sin embargo, cuando la imagen presenta un ambiente complejo donde las características que dividen ciertas regiones no son sencillas de identificar, como lo son las imágenes de ultrasonido, es necesario el uso de algoritmos complejos y un conocimiento profundo de las diferentes características que se pueden utilizar en la identificación de regiones [2].

En este capítulo se presenta un estudio detallado de diversos métodos que se han usado en la segmentación de tumores de mama, piel y tejido normal en imágenes de ultrasonido. El resultado de estas segmentaciones servirá para crear una máscara de segmentación para obtener una malla que represente la forma de cada uno de estos tejidos.

**3.1 Segmentación de tumores de mama en imágenes de ultrasonido 2D y 3D**

Un método de segmentación que sea capaz de diferenciar el tejido normal del tejido lesionado en una imagen de ultrasonido de mama puede disminuir considerablemente los errores en el diagnóstico y en procedimientos como la toma de biopsias causados por la mala visualización de la imagen [3]. Por otro lado, la segmentación del tumor permite el análisis de diversas características morfológicas de este como el tamaño, la forma y la textura, que sirven como apoyo en el diagnóstico de cáncer [4].

La segmentación de tumores de mama en imágenes de ultrasonido no es una tarea fácil, ya que existen ciertas características inherentes a esta modalidad de imágenes que dificultan el proceso como:

* *Speckle*: Las imágenes de ultrasonido presentan una apariencia granular llamada *speckle*, el cual es un fenómeno de interferencia no aditiva con un tamaño similar a la resolución del sistema de ultrasonido. En algunos casos esta es una característica no deseada en las imágenes ya que enmascara pequeñas diferencias en los niveles de gris [5].
* Sombras acústicas: En el ultrasonido las sombras acústicas aparecen como regiones de baja intensidad debajo de interfaces bordes con alta impedancia acústica y estas pueden limitar la eficiencia de las técnicas de procesamiento de imágenes [6].
* Bordes borrosos: La interfaz entre dos tejidos puede no estar bien definida en una imagen de ultrasonido si ambos poseen impedancias acústicas similares, esto causa que los bordes entre los dos tejidos tengan un aspecto borroso y no sean posibles de definir fácilmente [7]
* Forma: La forma de los tumores de mama puede variar significativamente dependiendo de su malignidad, haciendo difícil la segmentación del tumor mediante algoritmos que basan sus resultados en el uso de formas conocidas [4].

Como se mencionó anteriormente (capítulo 1), en la anatomía de la mama existen diversos tejidos que podrían confundirse con tumores, por su nivel de intensidad en las imágenes de ultrasonido, como el tejido, glandular, ligamentos de Cooper y la grasa subcutánea. Para distinguir una lesión en la mama de estos tejidos y las sombras acústicas se hace uso principalmente de tres característica:

* Distribución espacial: Los tumores de mama generalmente se encuentran en el parénquima de la mama, siendo el carcinoma ductal y el carcinoma lobular los más comunes [8]. Debido a esto y al protocolo de adquisición de imágenes utilizado durante el escaneo con ultrasonido es común encontrar las lesiones en la parte central de la imagen [9].
* Patrón interno de eco: El patrón interno de eco del tejido permite diferencias las lesiones de otros tipos de tejido y de las sombras acústicas, ya que generalmente las lesiones tienen un patrón de eco no homogéneo y con pocos ecos, mientras que el tejido glandular, las sombras acústicas y la grasa subcutánea tiene un patrón homogéneo [9].
* Ecogeneidad: Los tumores malignos están caracterizados como lesiones hypoecoicas mientras que los quistes y otras lesiones benignas están caracterizados como regiones casi anecoicas. Por esta razón se puede inferir que las lesiones sospechosas aparecen en la imagen de ultrasonido como regiones más oscuras que el tejido adyacente[10], [11].

Tomando en cuenta estas características se han realizado diversos trabajos para realizar segmentaciones automáticas o semiautomáticas de tumores de mama en imágenes de ultrasonido. Generalmente estos procesos se divide en una etapa de filtrado y mejora de contraste y una etapa de extracción de características para la segmentación.

Filtrado

Las imágenes de ultrasonido se han utilizado efectivamente para el diagnóstico de enfermedades durante décadas; desafortunadamente, estas imágenes se ven degradadas debido al *speckle,* que es el resultado de la suma constructiva y desctructiva de los ecos de ultrasonido[12]. El filtrado se realiza para homogeneizar las diferentes regiones de la imagen eliminando el *speckle*; sin embargo, este puede ser un proceso delicado ya que puede eliminar información valiosa en la imagen como bordes y texturas. En diversos trabajos relacionados con la segmentación de tumores de mama en imágenes de ultrasonido se ha realizado un proceso de filtrado con la intensión de obtener una región tumoral con un nivel de gris homogéneo para facilitar la segmentación cuando esta se basa en los niveles de gris de la imagen.

Los filtros pasa bajas son aquellos que preservan bajas frecuencias mientras atenúan frecuencias altas. Estos filtros se han usado en la segmentación de tumores de mama en diversos trabajos. Madabhushi *et al*. [9] hace uso de un filtro *butterworth*, el cual es uno de los filtros más básicos diseñado para producir la respuesta más plana posible hasta la frecuencia de corte [13]; este filtro es fácil de implementar y tiene un bajo costo computacional el cual no elimina muchos detalles importantes de la imagen [9]. Otro filtro pasa bajas utilizado frecuentemente en las imágenes de ultrasonido es el filtro Gaussiano [3], el cual se basa en una función de densidad de probabilidad Gaussiana para emborronar las imágenes y remover el ruido y preservar detalles mientras minimiza el tiempo de crecimiento y reducción del filtrado [13]. Sin embargo, estos filtros pueden conllevar problemas ya que tienden a emborronar los bordes de los objetos y la elección de las frecuencias de corte dependen principalmente de la imagen y de la aplicación [14].

Por las razones antes mencionadas, el uso de filtros adaptativos para la reducción de *speckle* en las imágenes de ultrasonido ha sido estudiado e implementado en diferentes trabajos. Estos filtros son filtros lineales con una función de transferencia controladas por parámetros variables y promedios obtenidos directamente de la imagen ajustados mediante un algoritmo de optimización [12]. Dentro de estos filtros destacan los filtros de difusión anistotópica, debido a que es una buena aproximación para la eliminación del *speckle* de la imagen sin emborronar los bordes de los objetos [15]. Los filtros de difusión remueven el ruido de una imagen resolviendo una ecuación diferencial basada en la ecuación de difusión de Fick (ecuación 3.1)

|  |  |
| --- | --- |
|  | 3.1 |

donde representa el flujo causado por el gradiente de concentración , y representa el tensor de difusión. Los filtros isotrópicos hacen uso de un tensor de difusión constante en toda la imagen esto causa que características importantes en la imagen como los bordes se vean borrosos y sean difíciles de identificar, la ecuación 3.2 muestra la ecuación diferencial que deben de resolver los filtros de difusión isotrópica [16].

|  |  |
| --- | --- |
|  | 3.2 |

donde es la imagen original ruidosa, representa el operador Laplaciano y representa un parámetro artificial de tiempo.

Perona y Malick reemplazaron la ecuación clásica de difusión isotrópica introduciendo una función que suaviza la imagen original mientras trata de preservar las discontinuidades de intensidad en los bordes; esta función es una anisotrópica que puede tomar una de dos formas (ecuación 3.3 y 3.4) [17].

|  |  |
| --- | --- |
|  | 3.3 |
|  | 3.4 |

donde es la magnitud del borde, que controla la conducción como función del gradiente. La ecuación 3.3 favorece contornos con alto contraste, mientras que la ecuación 3.4 favorece regiones con contraste pequeño [18]. La ecuación 3.2 para filtros anisotrópicos se muestra en la ecuación 3.5, donde esta preserva los bordes permitiendo difusión en líneas paralelas a los bordes pero no sobre ellos mediante el parámetro .

|  |  |
| --- | --- |
|  | 3.5 |

Mejora de Contraste

La mejora de contraste es una etapa utilizada para mejorar la apariencia visual de la imagen o para hacerla más aplicable en campos específicos [19]. Debido a la naturaleza del ultrasonido el uso de la mejora de contraste puede ayudar a diferenciar diferentes estructuras, mejorando la distribución de las intensidades de grises en las zonas de bajo contraste. La complejidad en la segmentación de algunas estructuras, como los tumores de mama, puede ser reducida cuando estas se encuentran claramente separadas del tejido adyacente [20].

Se han propuesto diferentes métodos para la mejora de contraste en imágenes de ultrasonido de tumores de mama, con el fin de resaltar ciertas características de los tumores para ser diferenciados del tejido adyacente. Uno de los métodos más usados para la segmentación de tumores de mama en imágenes de ultrasonido es el método de detección de *sticks*, el cual pretende encontrar líneas y bordes en una imagen con *speckle,* mediante la comparación con líneas rectas de longitud constante y en diferentes orientaciones [3], [4], [21]*.* Sin embargo este algoritmo solo mejora la información de bordes y no presta suficiente atención las características dentro de la lesión; otro inconveniente de este método es que en la presencia de *speckle* y la no homogeneidad de la forma de los tumores, elegir un set de *sticks*  óptimo para la aplicación no es una tarea sencilla [22]. Otro método utilizado comúnmente para acentuar áreas sospechosas y mejorar los bordes entre la lesión y el tejido adyacente es la ecualización del histograma debido a su baja complejidad computacional y buenos resultados ya que este se ajusta muy bien a las propiedades de la visión humana [9].

La ecualización del histograma es un método de mejora de contraste sencillo y directo el cual se apropia de los valores de intensidad de gris de los pixeles de tal manera que la imagen mejorada tiene un histograma lineal acumulativo. Este método desarrolla la diferencia de las regiones altas del histograma y restringe la diferencia de las regiones bajas del histograma [23]. Sea el histograma normalizado asociado con los niveles de intensidad de una imagen, el proceso para encontrar el histograma ecualizado () de consiste en:

1. Encontrar el histograma cumulativo normalizado (ecuación 3.6)

|  |  |
| --- | --- |
|  | 3.6 |

1. Encontrar el histograma ecualizado (ecuación 3.7)

|  |  |
| --- | --- |
|  | 3.6 |

donde es el valor menos del histograma cumulativo normalizado, es el número de pixeles en la imagen y L es el número de niveles de gris utilizados.

Análisis de Textura

Como se mencionó anteriormente, una de las características utilizadas en el ultrasonido de mama para distinguir las lesiones del tejido adyacente es el patrón interno de eco [9]. Esta característica puede ser evaluada y cuantificada mediante el análisis de textura haciendo uso de diferentes descriptores de textura. El análisis de textura se refiere a la caracterización de diferentes regiones de una imagen por su contenido de textura, cuantificando cualidades intuitivas descritas como suavidad y aspereza [24]. En las imágenes de ultrasonido los patrones de eco generalmente son referidos como texturas [25]; un buen método de segmentación de tumores de mama en imágenes de ultrasonido debe de tomar en cuenta las características de textura para diferenciar con mayor exactitud los tumores de otro objetos con niveles de gris similares como glándulas y sombras acústicas [9]. Sin embargo el análisis de textura en las imágenes de ultrasonido no es una tarea sencilla y muchas métricas de textura se han utilizado para modelar los patrones internos de eco en tumores de mama.

Los descriptores de textura de primer orden, son extraídos de los niveles de gris de la imagen original; estos no consideran la relación espacial con los pixeles vecinos [26]. Los descriptores de primer orden utilizados con mayor frecuencia son momentos centrales del histograma; sin embargo existen otros descriptores que no extraen la información del histograma [27]. Estos descriptores han sido utilizados en la segmentación y clasificación de tumores de mama en imágenes de ultrasonido; Huang et al. utilizan la media y la entropía del histograma, ecuación 3.7 y 3.8 respectivamente, para caracterizar la textura de los tumores para su posterior segmentación [21]; también la curtosis (ecuación 3.9) y la oblicuidad (ecuación 3.10) del histograma se han utilizado para la clasificación de malignidad en tumores de mama en imágenes de ultrasonido [28]. Otro descriptor de textura de primer orden, extraído de los niveles de gris de la imagen original, utilizado para la segmentación automática de tumores de mama en imágenes de ultrasonido es la varianza local , que se define como diferencia de intensidades de cada pixel con la media de sus vecinos (ecuación 3.11) [9].

|  |  |
| --- | --- |
|  | 3.7 |
|  | 3.8 |
|  | 3.9 |
|  | 3.10 |
|  | 3.11 |

Otros descriptores de textura utilizados frecuentemente en la segmentación y clasificación de tumores de mama en imágenes de ultrasonido son los descriptores de segundo, los cuales a diferencia de los descriptores de primer orden si toman en cuenta la relación espacial entre pixeles. La matriz de co-ocurrencia de los valores de gris (, ecuación 3.12) describe que la frecuencia en la que dos niveles ( y ) de gris aparecen en una ventana separados por una distancia () y un ángulo () [27].

|  |  |
| --- | --- |
|  | 3.12 |

Diversos descriptores de textura de segundo orden obtenidos del análisis de las matrices de co-ocurrencia han sido propuestos por Haralick [29]. Algunos de estos descriptores han sido utilizados para la segmentación y clasificación de tumores de mama; Lui et al. usan la entropía (ecuación 3.13) y el contraste (ecuación 3.14) de la matriz de co-ocurrencia para la segmentación de los tumores en imágenes de ultrasonido [30]; Liao et al. evalúan la habilidad de la homogeneidad (ecuación 3.15), contraste, energía (ecuación 3.16) y varianza (ecuación 3.17) de la matriz de co-ocurrencia para mejorar el contraste de los tumores con el tejido adyacente, concluyendo que la varianza es el mejor descriptor de textura de los cuatro para usarse en la mejora de contraste de tumores de mama en imágenes de ultrasonido [25].

|  |  |
| --- | --- |
|  | 3.13 |
|  | 3.14 |
|  | 3.15 |
|  | 3.16 |
|  | 3.17 |

Aunque los descriptores de textura toman en cuenta la relación espacial entre los pixeles, el costo computacional de la obtención de las matrices de co-ocurrencia es muy alto comparado con los descriptores de primer orden, Otro método para caracterizar texturas, que también toma en cuenta la relación espacial entre pixeles pero con un costo computacional menor al de las matrices de co-occurrencia se basa en el cálculo de las matrices *run-length* de los niveles de gris (, ecuación 3.18) , donde la matriz *run-length* de una imagen está definida como el número de veces que un nivel de gris () aparece secuencialmente en una distancia (, *runs*) hasta una distancia máxima (d) en un ángulo ().

|  |  |
| --- | --- |
|  | 3.18 |

Aunque estos descriptores no han sido ampliamente utilizados como un método efectivo para la clasificación y análisis de textura, se ha demostrado que estas matrices contienen vasta información de textura [31]. Galloway ha propuesto cinco descriptores de textura basados en el análisis de las matrices *run-length*: *short run emphasis* (SRE, ecuación 3.19), *long run emphasis* (LRE, ecuación 3.20), *gray-level nonuniformity* (GLN, ecuación 3.21), *run-length nonuniformity* (RLN, ecucación 3.22) y *run percentage* (RP, ecuación 3.23); Estos descriptores han sido utilizados principalmente para la clasificación de malignidad de tumores de mama en imágenes de ultrasonido [28], [32], [33]; sin embargo, estos, al igual que los descriptores basados en matrices de co-ocurrencia, podrían ser utilizados en la segmentación de tumores de mama en imágenes de ultrasonido. Las ecuaciones que definen estos descriptores se muestran a continuación

|  |  |
| --- | --- |
|  | 3.19 |
|  | 3.20 |
|  | 3.21 |
|  | 3.22 |
|  | 3.23 |

donde es el número total de *runs* y es el número de pixeles en la imagen.

La textura es una fuente importante de información visual en las imágenes de ultrasonido y existen diversos métodos para representar y cuantificar esta; debido a esto, es difícil definir las propiedades que se pueden utilizar para distinguir con eficiencia las texturas que encuentran dentro de una imagen [34]. Por otro lado, el realce de ciertas características en una imagen es clave para para mejorar la apariencia visual de esta y hacerla más agradable para la interpretación humana, o más aplicable en algunos campos especiales como la visión por computadora y segmentación de imágenes [19], [23]. Por estas razones, es importante evaluar cual descriptor de textura es aquel que mejora el contraste de la imagen significativamente y aumenta la exactitud en los resultados de los algoritmos de segmentación automática. En este trabajo se realizó una evaluación extensa de los efectos que tiene el uso de descriptores de textura (extraídos del análisis de los niveles de gris de la imagen original, matrices de co-ocurrencia y matrices *run-length*) en el contraste entre la región tumoral y el tejido adyacente en las imágenes de ultrasonido de mama y como es que estos mejoran los resultados de un método de segmentación automáico, los resultados de esta evaluación se muestran en capítulo 4 (Experimentos y resultados). Excepto por el trabajo realizado por Liao et al., donde se comparan la habilidad de diferentes de textura extraídos de las matrices de co-ocurrencia para mejorar el contraste y como afectan el resultado de segmentaciones manuales y automáticas, no existe otro trabajo relacionado que realice esta evaluación utilizando descriptores de textura de primer orden y segundo orden basados en matrices de co-ocurrencia y matrices *run-length*. En la tabla 3.1 se muestra una lista de los descriptores de textura evaluados en este trabajo junto los trabajos en los que han sido utilizados para la segmentación y/o clasificación de tumores de mama en imágenes de ultrasonido.

Segmentación de de bajo nivel

Como se mencionó anteriormente, la segmentación de tumores de mama en imágenes de ultrasonido no es una tarea sencilla debido a la presencia del *speckle*, bordes borrosos y sombras acústicas. Aunque la etapa de pre-procesamiento busca mejorar el contraste y homogeneizar diferentes regiones en la imagen, con el fin de resaltar el tumor para distinguirlo más fácilmente del tejido adyacente y otros objetos, la segmentación sigue presentando retos significativos. Diversos trabajos se han propuesto para la segmentación de tumores de mama, en la literatura se pueden encontrar dos principales grupos de algoritmos de segmentación, métodos basados en umbralización y métodos que hacen uso de clasificadores.

Tabla 3.1 Lista de descriptores de textura evaluados.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Tipo de Descriptor | Descriptor | Trabajo citado |
| Primer Orden | Media  Entropía  Curtosis  Oblicuidad  Varianza local | Huang et al. [21]  Huang et al. [21]  Piliouras et al. [28]  Piliouras et al. [28]  Madabhushi et al. [9] |
| Co-ocurrencia | Entropía  Contraste  Homogeneidad  Energía  Varianza | Liu et al. [30]  Liu et al. [30]  Liao et al. [25]  Liao et al. [25]  Liao et al. [25] |
| *Run-length* | SER  LRE  GLN  RLN  RP | Lefebvre et al. [33]  Lefebvre et al. [33]  Murmis et al. [32]  Murmis et al. [32]  Murmis et al. [32] |

Los primeros son métodos de fácil implementación y con bajo costo computacional, que hacen uso únicamente de la ecogeneidad de los tumores para diferenciarlos de los tejidos sanos. Las principales desventajas que presentan estos métodos son que no son capaces de distinguir entre los tumores y otras estructuras con niveles de gris similares como las sombras acústicas, y elegir un valor óptimo de umbral automáticamente no es fácil y este puede variar significativamente entre imágenes; por estas razones, estos métodos generalmente son métodos semiautomáticos en los cuales el usuario debe de elegir una región de interés y ajustar el nivel de umbral para la correcta segmentación. Para la elección automática del umbral se ha utilizado en método de Otsu [3], [4]; sin embargo, este método no siempre obtiene un umbral como se puede apreciar en la figura 3.1. En otros trabajos se ha utilizado un umbral fijo obtenido mediante experimentos [21].

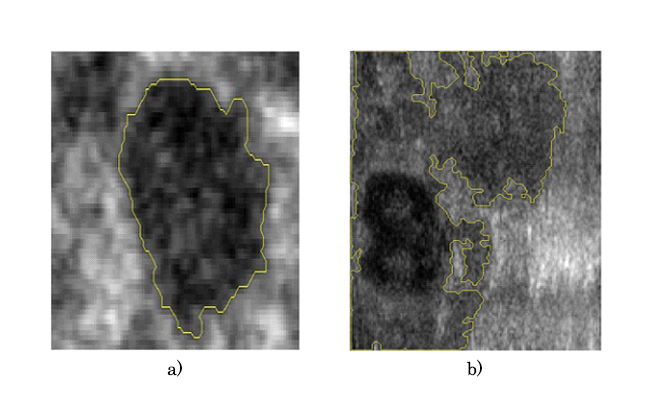


Figura 3.1 Segmentación con umbrales; a) segmentación correcta y b) segmentación incorrecta

Los métodos que hacen uso de clasificadores son más robustos que los métodos de umbralización, ya que estos hacen uso de más características del tumor para su segmentación. Generalmente, estos métodos utilizan la ecogeneidad (niveles de gris) y los patrones internos de eco (textura) como las principales características para la distinción del tumor con el tejido adyacente; en este trabajo se realiza una evaluación de diferentes descriptores de textura con el fin de demostrar que el uso de esta información aumenta la robustez de un método de segmentación basado en clasificadores. Aunque este tipo de métodos de segmentación son más robustos que los de umbralización, la implementación de estos es más difícil, tienen un costo computacional mayor y generalmente dependen de información *a priori* de las características del tumor. Algunos de los clasificadores que han utilizado en imágenes de ultrasonido para la clasificación de la imagen en regiones de tejido normal y tejido lesionado (tumor) han sido un *Kernel Support Vector Machine* [35], grafos [36] y redes neuronales [21], [37]. Otro método basado en la clasificación del tejido utilizando información *a priori* de las características de tumor es el método de Madabhushi et al. el cual hace uso de variables estadísticas de probabilidad que sirven como entrada un método de crecimiento de regiones para la segmentación del tumor [9].

El método de Madabhushi et al. consiste en realizar la segmentación del tumor en una imagen de probabilidad en lugar en una imagen de intensidad. Una imagen de probabilidad, se refiere a la representación visual de la probabilidad de cada pixel de pertenecer al tumor con respecto a ciertas características, entre mayor sea la probabilidad, mayor será la intensidad del pixel. Como características para calcular la probabilidad en este método se utilizan la ecogeneidad y el patrón interno de eco, imagen de intensidad e imagen de textura respectivamente. Para obtener la función de distribución de probabilidad () de intensidad () y de textura (), se hace uso de información *a priori* obtenida del histograma normalizado de tumores previamente segmentados [9].

La de intensidad se obtiene mediante la extracción del histograma normalizado de la región tumoral en imágenes pre-procesadas homogéneas y con alto contraste, en este caso la etapa de pre-procesamiento se realiza mediante un filtro de difusión anisotrópica gaussiano y una ecualización del histograma. Para obtener la de textura se hace uso de imágenes de textura, obtenidas mediante el procesamiento por pixel de las imágenes original sin ningún tipo de pre-procesamiento para evitar la eliminación de información relevante a la textura de, de estas imágenes de textura se extrae el histograma normalizado para generar .

Para segmentar un tumor en una nueva imagen de ultrasonido de tumores de mama se debe de obtener una imagen de probabilidad. Para obtener la imagen de probabilidad primero se obtienen una imagen de intensidad y una imagen de textura utilizando la misma etapa de pre-procesamiento y de análisis de textura que en el proceso de entrenamiento para obtención de y . Una vez obtenidas estas imágenes, se calcula la probabilidad de cada pixel de pertenecer al tumor con respecto a su intensidad y su textura, de este proceso se obtienen dos imágenes de probabilidad: que expresa la probabilidad de cada de pixel de pertenecer al tumor con respecto a su intensidad y es obtenida extrayendo la información de probabilidad de con respecto al nivel de gris que presenta cada pixel; que expresa la probabilidad de cada pixel de pertenecer al tumor con respecto a su textura y es obtenida extrayendo la información de probabilidad de con respecto al nivel de gris que presenta cada pixel. La imagen que utilizara para la segmentación es una imagen de probabilidad conjunta () que se obtiene mediante la multiplicación de la imagen de probabilidad de intensidad y de textura, ecuación 3.24.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 3.24 |

Mediante este procedimiento se pretende obtener una imagen donde se aprecie mejor el tumor y se pueda diferenciar del tejido normal a partir de información *a priori*. Una vez obtenida la imagen de probabilidad se hace uso de un método de crecimiento de regiones en la imagen para segmentar el tumor.

Madabhushi et al. proponen un método automático para encontrar la semilla del tumor basándose en la información de probabilidad y posición [9]. Con la sonda de ultrasonido colocada sobre la región de interés, la lesión generalmente aparece en el centro de la imagen, mientras que la grasa subcutánea, tejido glandular y la piel aparecen en la parte superior de la imagen; por esta razón, los pixeles que se encuentran en el área central de la imagen tienen mayor probabilidad de pertenecer al tumor. Por otro lado, la región de sombras en la imagen aparece en la parte posterior de la imagen; para eliminar puntos en la región de sombras y la región de tejido sano, que se puedan confundir con posibles semillas, se incorpora información espacial en la formulación matemática para la elección de la semilla. Para evitar que la toma decisión acerca de la posición de la semilla no dependa únicamente de un valor, se calcula el promedio de los valores de probabilidad de una región alrededor de la posible semilla.

Para cuantificar la probabilidad () de un pixel () de ser la semilla del algoritmo de crecimiento de regiones se utiliza la ecuación 3.25.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 3.25 |

donde es la probabilidad conjunta de ese pixel de pertenecer al tumor; es el promedio de la probabilidad conjunta de una región alrededor de la posible semilla; es la posición vertical del pixel y es la distancia Euclideana del pixel al centro de la imagen. Se calcula para todos los pixeles en y se selecciona como semilla a aquel pixel que tenga la mayor probabilidad.

Los métodos de crecimiento de regiones se han aplicado a imágenes médicas para la segmentación con anterioridad. Estos métodos emplean una umbralización global o local basándose en características homogéneas locales. Estas técnicas pueden ser menos confiables cuando se segmentan imágenes de tumores de mama debido a las variaciones de la intensidad de niveles de gris que presenta [38]; por esta razón, en este método de segmentación se realiza el crecimiento de regiones en una imagen de probabilidad y no en la imagen original, asegurando que solo los pixeles que tengan una alta probabilidad de pertenecer al tumor sean segmentados. Las condiciones para que un pixel pertenezca a la región del tumor son las siguientes (ecuación 3.26):

|  |  |
| --- | --- |
|  | 3.26 |

Donde la primera expresión () implica que el valor de en este dentro de un rango de valores dependiente del valor promedio de la vecindad de la semilla y los umbrales y ; mientras que la segunda expresión () implica que la vecindad del pixel () se intersecto con la región de tumor . Una vez obtenido el resultado del método de crecimiento de regiones se obtiene una imagen binaria la cual contiene la posible región tumoral, Una vez obtenida esta imagen se deben de encontrar los pixeles que pertenecen al borde del tumor y descartar aquellos que no pertenecen.

Para encontrar los pixeles pertenecientes al tumor se hace uso de una imagen de gradiente direccional , la cual está dada por la ecuación 3.27.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 3.27 |

Las derivadas parciales y se calculan de la imagen de intensidad y las derivadas normalizadas y se calculan como (ecuación 3.28)

|  |  |
| --- | --- |
|  | 3.28 |

donde y . y son matrices del mismo tamaño de que contienen las posiciones de los pixeles en la imagen respectivamente; son la posición de la semilla. Para cada pixel en se calcula la magnitud y la dirección del gradiente.

Para encontrar los bordes en , se escanea la imagen horizontal y verticalmente para detectar dos puntos de borde en cada escaneo, encontrando las posiciones del primer y el ultimo pixel con un valor diferente a cero. Por otro lado también se encuentran los puntos de borde en la imagen del gradiente direccional se dibujan líneas radiales desde la semilla hacia el borde de la imagen, como se puede observar en la figura 3.2, y se encuentra el máximo valor de intensidad sobre estas líneas.

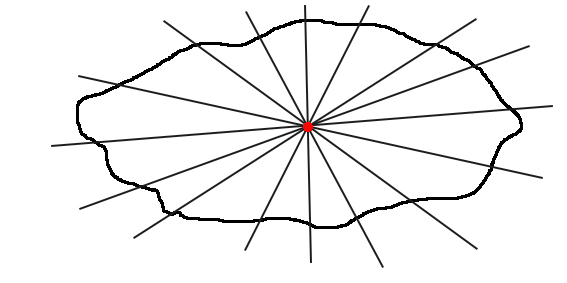


Figura 3.2 Obteniendo los puntos de borde en

Una vez encontrados los grupos de pixeles que pertenecen al borde mediante e ( respectivamente), se calcula la distancia de todos los puntos de a todos los puntos de . Este procedimiento se realiza para eliminar los puntos de borde encontrados en que corresponden a máximos locales debido a las no homogeneidades de la imagen del gradiente direccional. Para remover los pixeles que se encuentran fuera de los bordes del tumor se siguen los siguientes pasos:

1. Para todo pixel que existe en se encuentra la distancia mínima () a todos los pixeles que existen en .
2. Un pixel es considerado para su eliminación si donde es una constante predeterminada, es la distancia Euclideana entre el pixel y la semilla, y es el promedio de .

De esta manera se eliminan los puntos en que no tienen un punto correspondiente en la proximidad de cualquier punto en . Sin embargo también se deben de eliminar los pixeles en que no pertenezcan al borde del tumor, esto se realiza mediante los siguientes pasos recursivos:

1. Se calcula el promedio de las distancias Euclideanas entre los puntos de y la semilla .
2. Un pixel es considerado para su eliminación si donde y son constantes predeterminadas.
3. Si en la iteración , donde es un valor umbral predeterminado, se detiene la eliminación; si no se cumple esta regla se regresa al paso no. 1.

Segmentación de alto nivel

Los modelos deformables, como *snakes*, contornos activos y *level-sets* se han utilizado en herramientas de segmentación de imágenes satisfactoriamente. En estos métodos basados en bordes se debe de inicializar un modelo de forma cercano a los bordes de la objeto y se hace uso de características de la imagen para ajustar este modelo al borde real. Para evitar errores en la segmentación debido a mínimos locales, la mayoría de estos métodos requieren que la inicialización del contorno sea cercana a solución final; para evitar que esta inicialización sea realizada manualmente, algoritmos de bajo nivel como el descrito por Madabhushi et al. pueden ser utilizados para encontrar una inicialización automática [9].

Aunque los métodos de contornos activos y *snakes* de han utilizado extensivamente para determinar los bordes de un objeto de interés en imágenes de ultrasonido, estos son tardados y costosos computacionalmente. Los *level-sets*, son métodos que se basan en la minimización de energía de un contorno activo, superando a los *snakes* en rendimiento y estabilidad [39]. Otra ventaja de estos métodos es que pueden representar contornos y superficies con topologías complejas de un modo natural [40]. Otra ventaja de los *level-sets* es que cambios topológicos como rupturas y fusiones de bordes se pueden definir y realizar bien sin implicación emocional [41]. El método de *level-sets* fue introducido en 1987 por Osher y Stehian y se ha probado que es un método numérico robusto en una colección diversa de problemas dentro del mundo de las imágenes, como procesamiento de imágenes, visión por computadora y graficación. En el proceso de segmentación, el rol de un método de *level-set* generalmente se relaciona con técnicas de solución de ecuaciones diferenciales parciales para la representación de bordes [42]. Estos métodos dependen en posición, tiempo, geometría de la interfaz y una función de energía [43].

Para una imagen se puede crear una función *level-set* que describa el contorno del objeto. El contorno se define como la función cero del *level-set* (ecuación 3.29)

|  |  |
| --- | --- |
|  | 3.29 |

La ecuación 3.30 muestra las propiedades de la curva .

|  |  |
| --- | --- |
|  | 3.30 |

La evolución de la función *level-set* se puede escribir de forma general como una ecuación diferencial parcial no lineal, como se muestra en la ecuación 3.31.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 3.31 |

donde define la velocidad de propagación que especifica cómo se mueven los puntos en el tiempo.

La función generalmente se calcula como la distancia con signo de los puntos en la imagen hacia la curva que denota el borde. La velocidad de propagación es una ecuación conocida determinada por la curvatura local en el *level-set* cero. Esta función se puede representar por la ecuación 3.32

|  |  |
| --- | --- |
|  | 3.32 |

donde es la información local, que se determina por propiedades locales de geometría, como la curvatura y la dirección de la normal; son las propiedades globales de la curva que dependen de la forma y posición de esta; representa las propiedades independientes las cuales no dependen de la curva. Es difícil elegir un modelo genérico para la función de propagación de velocidad, ya que está relacionada con la aplicación.

Para definir una función de velocidad de propagación en la segmentación de imágenes se ha propuesto que la función de propagación se represente como (ecuación 3.33)

|  |  |
| --- | --- |
|  | 3.33 |

La influencia de la función de velocidad se separa en dos partes y , donde es el término de advección que causa que la curva se expanda o contraiga uniformemente, y depende de la geometría de la curva, como su curvatura local. Un ejemplo de la forma que puede tomar esta función es , donde s una constante. La constante 1 ó -1 actúa como un término de advección (), para expandir o contraer la curva. El termino difuso () mantiene suave la propagación de la curva. Este término se multiplica por una función de paro , ecuación 3.34.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 3.34 |

donde la expresión es la convolución de la imagen con un filtro Gaussiano con desviación estándar . Cuando se encuentran regiones homogéneas, converge a cero, de esta manera el efecto que tiene en es menor. En el caso cuando se encuentran bordes se acerca a cero, y esta actúa como un criterio de interrupción y detiene la evolución de la curva en la región deseada [44].

Los *level-sets* han sido utilizados satisfactoriamente en la segmentación de tumores de mama en imágenes de ultrasonido [39], [45]. Lin et al. proponen un método semiautomático para la segmentación de tumores de mama mediante *level-sets*, encontrando el contorno inicial mediante un método de crecimiento de regiones, basándose únicamente en los valores de intensidad de la imagen original [45]. Huang et al. hacen uso de una umbralización, obteniendo el valor del umbral mediante el método de Otsu, para seleccionar una región de interés rectangular que abarque la mayor área segmentada por la umbralización; el contorno inicial para el *level-set* se define como una elipse cuyo centro se encuentra en el pixel central de la región de interés [39].

Mediante la combinación de un método de segmentación de bajo nivel como el propuesto por Madabhushi et al. y el uso de contornos activos como los métodos de *level-sets* se puede obtener un algoritmo de segmentación robusto que toma en cuenta diversas características de la imagen como la ecogeneidad y los patrones internos de eco [9].

**3.2 Segmentación de piel y tejido en imágenes de ultrasonido 2D y 3D**

Para realizar un modelo computacional completo y exacto a partir de imágenes ultrasonido es necesario conocer la geometría del órgano o tejido y condiciones de frontera [46]. La mama está constituida por tres tipos de tejido principalmente, grasa, tejido glandular y ligamentos; desafortunadamente, en el ultrasonido no es posible distinguir entre estos tejidos debido a su baja resolución; no obstante, se ha demostrado que es suficiente utilizar un modelo constitutivo que solo incluya las propiedades del tejido glandular y las condiciones de frontera para obtener un modelo computacional completo y exacto [47]. Por esta razón, además de la segmentación del tumor, es necesaria la segmentación de la piel y el tejido sano para conocer las condiciones de frontera y la geometría del tejido.

Segmentación de la piel en imágenes de ultrasonido

Existe poca o nula literatura acerca de la segmentación de piel en imágenes de ultrasonido. Oliver et al. realizan la segmentación de las diferentes capas de la piel en imágenes de ultrasonido utilizando descriptores de textura; este trabajo utiliza un ultrasonido de alta resolución en la cual se pueden diferenciar las diferentes capas que conforman la piel [48]. En las imágenes de ultrasonido de tumores de mama convencional no se es posible diferenciar estas capas; sin embargo como se mencionó anteriormente en la sección 1.2, la piel se observa como la parte más brillante en la parte superior de la imagen [9] y tiene un espesor aproximado de 0.5mm [8].

En este trabajo se propone un método para segmentar la piel en imágenes de ultrasonido obtenidas mediante la técnica de ultrasonido 3D a mano libre. Este método está basado en el presentado por Fanti et al. para la segmentación de huesos en imágenes de ultrasonido, donde la superficie del hueso aparece como un conjunto de conectado de pixeles brillantes [49]. Este método de segmentación se basa en el realce de superficies; este procedimiento se lleva a cabo mediante métodos de realce de superficies basados en geometría diferencial haciendo una evaluación de los eigenvalores de la matriz Hessiana de la imagen [50], [51].

El método propuesto es un método semiautomático el cual consiste en los siguientes pasos:

1. Realce de superficies en la imagen de ultrasonido [49].
2. Umbralización de la imagen de realce de superficies.
3. Clasificación de los pixeles en una región de interés.

El realce de superficies se realiza mediante la evaluación de los eigenvalores de la matriz Hessiana. La segunda derivada de una imagen provee información acerca de diferentes estructuras geométricas que se pueden encontrar en la imagen haciendo uso de las intensidades locales de esta, como cilindros, *blobs* o superficies [50]. Esta información se obtiene mediante el análisis de los eigenvalores de la matriz Hessiana de cada pixel de la imagen de entrada . Para obtener la matriz Hessiana primero se deben de calcular las derivadas parciales direccionales de segundo orden, estas se aproximan mediante la convolución de un filtro gaussiano de segundo orden con la imagen, ecuación 3.34.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 3.35 |

donde es el factor de escala deseado, que depende del tamaño de las estructuras que se desean resaltar. La matriz Hessiana de una imagen es una matriz simétrica que contiene las derivadas parciales direccionales de segundo orden y se define como (ecuación 3.36)

|  |  |
| --- | --- |
|  | 3.35 |

Una vez obtenida la matriz Hessiana, se deben de calcular los tres eigenvalores principales , y para cada pixel en la imagen. Sato et al. proponen una serie de relaciones entre los eigenvalores para discriminar entre estructuras cilíndricas, *blobs* o superficies, estas relaciones se muestran en la tabla 3.2. Para realizar el realce de los pixeles que pertenecen a una superficie, se seleccionan los pixeles que satisfagan la condición de superficie en la tabla 3.2 y se les asigna el valor de .

Tabla 3.2 Relación de eigenvalores de la matriz Hessiana

|  |  |
| --- | --- |
| Estructura Local | Relación |
| Superficie |  |
| Cilindro |  |
| *Blob* |  |

El proceso de realce de superficies realza todas aquellas estructuras que cumplan con la condición anterior, eliminando todas aquellas que no la cumplan; sin embargo, este proceso incluye muchas otras superficies que pueden no pertenecer a la piel. Para evitar la segmentación de estructuras que no correspondan a la piel se debe de seleccionar una región de interés en la cual se encuentre la piel. Para realizar este proceso se decidió utilizar una umbralización manual mediante dos valores de umbral para segmentar posibles regiones de segmentación; de esta manera se descartan por el usuario regiones que no cumplan con ciertas características visuales para pertenecer a la piel.

La región de interés se define como la mayor área segmentada por la umbralización que se encuentre lo más cerca posible al borde superior de la imagen, basándose en la distribución espacial de las imágenes de ultrasonido de tumores de mama explicada en la sección 1.2. La clasificación de los pixeles se realiza mediante clasificador ingenuo de Bayes, utilizando las intensidades de la imagen original y de la imagen de realce de superficies como características para la clasificación [49]; el cual clasifica los pixeles que se encuentran en la región de interés seleccionada en el proceso de umbralización. Este clasificador se entrena haciendo uso de imágenes previamente segmentadas en las cuales se selecciona manualmente una región de interés.

El teorema de Bayes proporciona un método para combinar las probabilidades *a priori* de una clase, con los valores de ciertas características para así tomar una decisión sobre la probabilidad de que el patrón pertenezca a la clase. Los clasificadores de Bayes simplifican considerablemente el aprendizaje asumiendo que las clases y sus características son independiente; aunque esta asunción no sea cierta, estos clasificadores en la práctica son notablemente exitosos, ya que es posible obtener un clasificador óptimo mientras que las distribuciones estimadas y las reales concuerden en la clase más probable [52]. El teorema de Bayes define la probabilidad *a posteriori* () de que un pixel pertenezca a cierta clase (ecuación 3.36)

|  |  |
| --- | --- |
|  | 3.36 |

donde es la probabilidad *a priori* de que cualquier patrón pertenezca a la clase ; es la probabilidad condicional de que un patrón tenga un valor dado que pertenece a la clase ; es un patrón de normalización que asegura que la suma de las probabilidades posteriores para todas las clases sea 1. La probabilidad *a posteriori* nos permite tomar decisiones óptimas sobre la clase a la que pertenece un patrón, asignando el patrón a la clase con más alta probabilidad. En un problema de clasificación de varias clases (,,…,) se puede asignar un patrón a la clase si:

|  |  |
| --- | --- |
|  | 3.37 |

De esta manera se definen las funciones discriminantes de Bayes como:

|  |  |
| --- | --- |
|  | 3.38 |

donde y es el número total de clases. Una manera simple de utilizar las funciones discriminantes de Bayes es suponer que las probabilidades condicionales ( de las clases tienen una distribución Gaussiana, ecuación 3.39.

|  |  |
| --- | --- |
|  | 3.39 |

donde es la dimensión del vector de características; , y son la media, el promedio y la matriz de covarianza de las características en la clase , obtenidas en la etapa de entrenamiento mediante imágenes previamente clasificadas. De esta manera la ecuación 3.38 se puede expresar como

|  |  |
| --- | --- |
|  | 3.40 |

donde se obtiene como el número de pixeles pertenecientes a la clase sobre el número total de pixeles en las imágenes de entrenamiento. Un patrón se asigna a la clase si . Los resultados del método de segmentación propuesto se muestran en el siguiente capítulo (Experimentos y resultados).

Segmentación del tejido normal en imágenes de ultrasonido

Para la creación de volúmenes de ultrasonido con la técnica a mano libre es necesario crear un arreglo de voxeles, sin embargo elegir óptimamente el tamaño, número de voxeles y la orientación del arreglo no es una tarea sencilla. En la implementación del método de reconstrucción de volúmenes de ultrasonido, reportada en el capítulo 2 (Ultrasonido 3D a mano libre), el tamaño y la orientación del arreglo de voxeles se definieron a partir de las menores y mayores posiciones de las imágenes 2D localizadas en el espacio, con estos datos se genera un paralelepípedo que encierre a todas las imágenes. El principal problema que existe con este método es que existirán voxeles vacíos ya que la información que se puede obtener de los pixeles de la imagen no rellena todo el paralelepípedo como se puede observar en la figura 3.3.

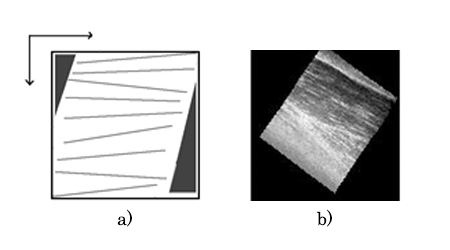


Figura 3.3 Voxeles vacíos en el proceso de reconstrucción a) diagrama esquemático y b) corte de un volumen reconstruido con voxeles vacíos.

Al igual que con la segmentación de la piel en imágenes de ultrasonido, en la literatura existen pocos trabajos en los cuales se describa el proceso para seleccionar un arreglo de voxeles de manera óptima. Chen et al. proponen elegir manualmente una región de interés y solo realizar la reconstrucción en esta sección del volumen [3]; esta solución permite asegurar que todos los voxeles del arreglo tengan información del tejido, sin embargo el proceso es manual y se puede perder información relevante que pudiera ser requerida posteriormente. Poe otro lado, Estepar et al. proponen un método para encontrar la orientación y el tamaño del arreglo de voxeles basándose en el análisis de componentes principales de los pixeles de las imágenes 2D, sin embargo esta solución no garantiza que no existan voxeles vacíos [53].

Por esta razón es necesario realizar la segmentación del tejido en volúmenes de ultrasonido generados con la técnica a manos libres. Aunque a simple vista el proceso de segmentación del tejido pareciera un problema que se puede resolver fácilmente, la implementación de un método automático no es sencilla debido a que es difícil obtener bordes uniformes en la imagen debido a que los ecos de porciones anguladas en los bordes no son recibidas correctamente por el sensor generando espacios grandes , traslapes y ambigüedades entre los bordes del órgano [54]. Debido a este problema, métodos de umbralización pueden no tomar en cuenta ciertas regiones de la imagen debido a su baja intensidad de gris, este problema se incrementa en la presencia de sombras acústicas, como es el caso de las imágenes de ultrasonido de tumores de mama. En la literatura se encuentra poco trabajo relacionado con este problema, el trabajo más relevante es presentando por Zhang et al., en el cual se realiza la segmentación de la superficie del tejido en volúmenes de ultrasonido obtenidos con la técnica a mano libre mediante *level-sets*, sin embargo presenta el inconveniente que la inicialización del *level-set* se realiza manualmente [55].

Aquí se propone un método sencillo para encontrar la inicialización del *level-set* haciendo uso de métodos de procesamiento de imágenes básicos. Para realizar la segmentación inicial se propone realizar una extracción de bordes en la imagen mediante el algoritmo de Canny para extraer la superficie del tejido en las imágenes de ultrasonido. Despues de la extracción de bordes se realizan operaciones morfológicas sencillas para obtener la región del tejido completa. Se decidió utilizar métodos de morfología matemática por su simpleza y su eficiencia lidiando con características geométricas como tamaño, forma, contraste y conectividad [56]; la segmentación de objetos geométricos en imágenes de ultrasonido con aplicación directa de morfología matemática puede ser más útil que técnicas de procesamiento de imágenes mediante convolución, ya que esta se relaciona directamente con la forma [57]. Por otro lado, la morfología matemática se ha utilizado en imágenes de ultrasonido para encontrar el contorno inicial de modelos deformables para la segmentación de tumores de mama [58].

La morfología matemática es una técnica popular usada en el procesamiento de imágenes. Este método de procesamiento utiliza dos conjuntos para realizar diferentes operaciones entre ellos: la imagen y un *kernel* de operación llamado elemento estructural. Diferentes operaciones se pueden realizar entre estos sets; lo principales operadores morfológicos son la dilatación y la erosión, mientras que otras operaciones morfológicas son la combinación de estas dos operaciones básicas. La dilatación de una imagen binaria (blanco y negro) se puede expresar como la ecuación 3.41 y se puede ver como una hinchazón de los objetos en la imagen en el punto (centro del elemento estructural) cuando el elemento estructural intersecta al objeto . Por otro lado la erosión de una imagen binaria puede expresarse como la ecuación 3.42 y se puede ver como el encogimiento de los objetos en la imagen en el punto cuando el elemento estructural intersecta al complemento del objeto [57].

|  |  |
| --- | --- |
|  | 3.41 |
|  | 3.42 |

El tamaño y la forma del elemento estructural juegan un rol importante en la detección o extracción de características con cierta forma y tamaño en la imagen [58].

En el método de segmentación propuesto primero se realiza una dilatación de la imagen para unir los bordes encontrados mediante el algoritmo de Canny, que se encuentren separados por las cuestiones antes mencionadas. Posteriormente se realiza un llenado de los huecos que quedaron dentro de la región mediante el algoritmo de relleno por difusión (*flood fill*). Una vez encontrada la región completa del tejido esta se suaviza mediante una erosión morfológica.

El algoritmo de *flood fill* es comúnmente utilizado para rellenar huecos en una imagen binaria, cambiando los pixeles de fondo hasta llegar a los bordes de los objetos. Los bordes de la imagen deben de estar especificados por conectividad. El algoritmo inicia asignando un valor de 1 (blanco) a un pixel dentro de los bordes del objeto y crece la región realizando dilataciones iterativamente hasta llegar a una condición de limite. Si y es un elemento estructural de cruz, el proceso iterativo para el objeto se realiza como:

|  |  |
| --- | --- |
|  | 3.43 |

Las iteraciones terminan si . Esto implica que es el interior del objeto y la unión entre y es la región rellenada y los bordes del objeto [59]. Este algoritmo se ha utilizado en el ultrasonido para la segmentación de tumores de mama después de encontrar los bordes la lesión [60].

Una vez obtenida la región del tejido mediante la dilatación, *flood filling* y la erosión, se utilizan los bordes de esta región como inicialización para un *level-set*; de esta manera se obtiene un algoritmo automático para la segmentación del tejido en volúmenes de ultrasonido obtenidos mediante la técnica a mano libre basado en el algoritmo propuesto por Zhang et al [54].

**3.3 Creación de una malla 3D de ultrasonido de mama**

Las imágenes médicas pueden ser de gran utilidad en la asistencia de procedimientos médicos y en el diagnóstico de diversa patologías. Las imágenes preoperatorias ayudan al médico en la planeación de los procedimientos y pueden ser de gran ayuda durante la realización de los mismos; sin embargo, debido al desplazamiento del tejido que ocurre durante cualquier procedimiento invasivo por la interacción de la herramientas quirúrgicas con el tejido, las imágenes preoperatorias presentan ciertas limitaciones y pueden ser causantes de errores de exactitud durante la realización del procedimiento. Por esta razón, el uso de imágenes intraoperatorias es necesario para mejorar la exactitud de los procedimientos. Actualmente existen diversas técnicas de imagenlogía que son capaces de obtener imágenes en tiempo real; sin embargo, la mayoría de estas técnicas, como la radiografía intervencionista, fluoroscopía y resonancia magnética, son técnicas invasivas, costosas y/o estorbosas en el quirófano. El ultrasonido 2D y 3D son una solución no invasiva de bajo costo, sin embargo tienen la limitante de poder visualizar solo un corte plano o una pequeña porción de la anatomía del paciente en tiempo real. Esto indica que se requiere una nueva generación de sistemas guiados por imágenes adaptativas [61].

Con este enfoque se han desarrollado diversos trabajos para obtener imágenes preoperatorias que puedan ser actualizadas durante el procedimiento. Muchos de estos trabajos se enfocan en el uso de ultrasonido tridimensional y modelos deformables, como modelos de elemento finito (*FEMs*) o modelos de masas y resortes [62]–[66]. Para obtener un modelo deformable que describa el comportamiento mecánico del tejido con exactitud Misra et al. mencionan tres requisitos principales: geometría del órgano o tejido, condiciones de frontera y un modelo constitutivo del tejido [46]. Una desventaja de la generación de modelos deformables a partir de imágenes o volúmenes de ultrasonido es que solamente se obtiene información del tejido bajo el área con la cual tuvo contacto la sonda, causando que la geometría del órgano no pueda ser descrita completamente; sin embargo Jordan et al. comrobaron que la mayor parte de la contribución a la respuesta del tejido a la interacción con las herramientas quirúrgicas es local [67]. Por otro lado, la mayoría de los modelos deformables, como *FEMs* o modelos de masas y resortes, describen la geometría del tejido mediante una malla de puntos interconectados, en donde destacan las mallas de elementos tetraédricos por su flexibilidad para representar geometrías complejas [68].

Existen muchos algoritmos para la generación de mallas que describan la geometría de diferentes objetos; sin embargo, en aplicaciones médicas el algoritmo debe de cumplir con ciertos requisitos [69]:

* Debe de tratar directamente con imágenes médicas en niveles de gris o segmentadas.
* Las mallas deben de ajustarse a la región de interés con buena calidad.
* Se deben de producir mallas adaptativas.
* Debe de ser veloz.

Dentro de los algoritmos de mallado, destaca la tetraedrización de Delaunay